

# JURNAL KONSTRUKSI DAN INFRASTRUKTUR

## Teknik Sipil dan Perencanaan

---

### MITIGASI GETARAN *ENCLOSED HIGH TEMPERATURE FLARING SYSTEM (EHTFS)* BERBASIS *OPERATIONAL MODAL ANALYSIS* DAN INTERAKSI TANAH–STRUKTUR

Heri Khoeri<sup>1\*</sup>, Wisnu Isvara<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>) Universitas Tama Jagakarsa

Email Penulis Korespondensi: [hkhoeiri@hesa.co.id](mailto:hkhoeri@hesa.co.id)

Nomor HP Penulis Korespondensi : 08158255374

<sup>2</sup>) Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Email: [wisnu.isvara1@ui.ac.id](mailto:wisnu.isvara1@ui.ac.id)

#### ABSTRACT

Enclosed High Temperature Flaring Systems (EHTFS) are employed to control gas emissions through high-temperature enclosed combustion; however, structural modifications such as flare stack heightening may alter dynamic characteristics and induce environmental vibration problems. This study evaluates vibration responses induced by EHTFS operation and investigates the mechanisms of vibration amplification and resonance affecting surrounding structures. Field measurements were carried out using three-axis accelerometers installed on the flare stack, supporting structures, soil, and nearby residential buildings during flaring events. Structural dynamic properties were identified using Operational Modal Analysis (OMA) based on the Stochastic Subspace Identification (SSI) method, combined with an assessment of soil–structure interaction. The results show dominant vibration frequencies of 6.1–6.2 Hz, where the natural frequencies of the flare stack and nearby houses are closely spaced. Peak acceleration at residential buildings reached 0.149 m/s<sup>2</sup>, approximately twice that at the source (0.074–0.077 m/s<sup>2</sup>), indicating significant amplification. Soil investigation revealed shear-wave velocities of 168–257 m/s with relative dynamic amplification factors up to 1.0. Although soil–structure interaction influences wave propagation, the observed amplification is primarily attributed to low-frequency resonance between operational excitation and structural natural frequencies. Increasing flare stack stiffness effectively shifts the natural frequency and reduces resonance potential. The proposed integrated OMA–SSI framework provides a reliable basis for vibration mitigation in industrial flaring facilities.

**Keywords:** *dynamics, EHTFS, mitigation, resonance, vibration*

## 1. PENDAHULUAN

Getaran akibat aktivitas industri merupakan isu penting dalam konteks keselamatan struktur dan kenyamanan manusia, khususnya pada fasilitas energi yang beroperasi di dekat kawasan permukiman. *Enclosed High Temperature Flaring System (EHTFS)* dirancang untuk mengurangi emisi gas buang melalui pembakaran bersuhu tinggi dalam ruang tertutup, namun perubahan konfigurasi struktur seperti peninggian *flare stack* dapat mengubah karakteristik dinamik dan memicu peningkatan respons getaran.

Sejak dilakukan peninggian *flare stack* pada lokasi studi, masyarakat sekitar melaporkan adanya peningkatan getaran yang dirasakan pada bangunan hunian. Secara teoritis, peningkatan tinggi struktur kantilever tanpa diimbangi penambahan kekakuan akan menurunkan frekuensi alami struktur, sehingga berpotensi mendekati frekuensi eksitasi dominan akibat proses *flaring* dan meningkatkan risiko resonansi pada frekuensi rendah [1]. Selain itu, kondisi tanah setempat berperan dalam mengamplifikasi

rambatan getaran, menyebabkan respons yang berbeda antar lokasi melalui mekanisme interaksi tanah–struktur dan perbedaan kecepatan rambat gelombang geser [2], [3].

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi respons getaran akibat operasi *EHTFS* berdasarkan pengukuran lapangan, mengidentifikasi parameter dinamik struktur dan tanah menggunakan pendekatan *Operational Modal Analysis (OMA)* berbasis *Stochastic Subspace Identification (SSI)* [4], [5], [6], serta menilai kesesuaian tingkat getaran terhadap standar kenyamanan dan keamanan yang berlaku, khususnya ISO 2631-2 dan baku mutu getaran nasional [7], [8].

*Operational Modal Analysis (OMA)* telah banyak digunakan untuk mengidentifikasi parameter dinamik struktur yang beroperasi secara kontinu. Metode berbasis *Stochastic Subspace Identification (SSI)* memungkinkan estimasi frekuensi alami, rasio redaman, dan bentuk mode getar (*mode shape*) hanya dari respons getaran terukur tanpa memerlukan informasi gaya eksitasi secara langsung [4], [5], [6], [9]. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa struktur industri yang mengalami perubahan geometri, seperti peninggian struktur kantilever, cenderung mengalami penurunan frekuensi alami dan peningkatan kerentanan terhadap resonansi. Selain itu, studi-studi mitigasi getaran merekomendasikan peningkatan kekakuan struktur dan pengendalian karakteristik dinamik tanah sebagai strategi efektif untuk mengurangi respons getaran berlebih pada fasilitas industri [1], [10], [11].

Studi sebelumnya umumnya berfokus pada analisis dinamik struktur atau pengukuran getaran secara terpisah. Pengaruh interaksi tanah–struktur sering dievaluasi secara numerik atau teoritis tanpa dikombinasikan dengan pengukuran lapangan dan identifikasi modal. Sehingga penelitian yang mengintegrasikan pengukuran getaran *in-situ*, *Operational Modal Analysis (OMA)*, dan evaluasi geoteknik dalam satu kerangka terpadu untuk mendukung keputusan mitigasi secara langsung masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pendekatan berbasis lapangan yang menggabungkan monitoring getaran, analisis *OMA–SSI*, dan investigasi tanah untuk mengidentifikasi mekanisme resonansi serta merumuskan strategi mitigasi getaran pada fasilitas *EHTFS*.

## 2. METODE

Tahapan metodologi pada penelitian ini dirancang secara terpadu untuk mengidentifikasi mekanisme amplifikasi getaran secara kuantitatif. Pengukuran getaran lapangan menghasilkan data percepatan sebagai respons aktual sistem. Data tersebut dianalisis menggunakan *FFT/PSD* untuk memperoleh frekuensi dominan eksitasi serta menggunakan *Operational Modal Analysis (OMA)* untuk mengidentifikasi frekuensi alami, rasio redaman, dan mode shape struktur. Selanjutnya, investigasi geoteknik melalui CPT digunakan untuk mengestimasi parameter dinamik tanah ( $v_s$  dan  $v_{s30}$ ) yang merepresentasikan kekakuan medium rambatan gelombang.

Pengukuran getaran dilakukan menggunakan sensor *accelerometer* tiga sumbu yang ditempatkan pada *flare stack*, *pile cap*, tanah, dan bangunan warga di beberapa arah. Lokasi penempatan sensor *accelerometer* seperti diberikan pada **Gambar 1**. Pengujian getaran dilakukan dalam operasi *flaring*. Pengukuran dilakukan dengan frekuensi sampling ( $f_s$ ) sebesar 100 Hz. Nilai ini dipilih untuk memastikan respons getaran frekuensi rendah ( $< 20$  Hz) dapat terekam secara memadai, sekaligus memenuhi kriteria Nyquist ( $f_{\text{Nyquist}} = 50$  Hz) sehingga efek aliasing dapat dihindari. Setiap pengukuran direkam selama 300–600 detik, menghasilkan resolusi frekuensi sekitar  $\Delta f \approx 0,002\text{--}0,003$  Hz.

Rekaman data percepatan kemudian ditransformasi ke domain frekuensi menggunakan *Fast Fourier Transform (FFT)* [12]. Sinyal percepatan mentah diproses melalui tahap detrending dan penyaringan menggunakan band-pass filter 0,1–25 Hz untuk menghilangkan drift frekuensi rendah dan noise frekuensi tinggi. Analisis spektral dilakukan menggunakan *Fast Fourier Transform (FFT)* dan *Power Spectral Density (PSD)* dengan *window Hanning* serta *overlap 50%* guna meningkatkan kestabilan spektrum. Spektrum *PSD* antara tanah, fondasi, *flare stack*, dan dinding bangunan dibandingkan untuk mengevaluasi amplifikasi relatif getaran. Parameter amplitudo yang digunakan dalam penelitian ini

adalah *Peak Ground Acceleration (PGA)* dengan satuan  $m/s^2$ , yang didefinisikan sebagai nilai percepatan maksimum absolut dari setiap rekaman waktu. Nilai *RMS acceleration* dihitung sebagai parameter pendukung analisis spektral. Identifikasi parameter dinamik dilakukan dengan *OMA* berbasis algoritma *SSI* untuk memperoleh frekuensi alami, rasio redaman, dan *mode shape* sistem. Identifikasi parameter dinamik dilakukan menggunakan *Operational Modal Analysis (OMA)* berbasis *Stochastic Subspace Identification (SSI)* dengan bantuan perangkat lunak *Sigview* dan *Mathematica Wolfram*. Orde model yang diuji berkisar 20–80. Mode dinyatakan stabil apabila memenuhi kriteria perubahan frekuensi  $<1\%$ , perubahan rasio redaman  $<5\%$ , serta *Modal Assurance Criterion (MAC)*  $> 0,90$  antar orde berturut. Selanjutnya, parameter dinamik hasil pengujian digunakan untuk memvalidasi model numerik *flare stack* [13], [14].

Investigasi geoteknik dilakukan melalui pengujian *Cone Penetration Test (CPT/sondir)* di beberapa titik representatif (**Gambar 1**). Data sondir diinterpretasikan untuk memperoleh stratifikasi tanah, estimasi nilai  $v_s$ , serta potensi amplifikasi getaran. Analisis numerik struktur dan tanah dilakukan menggunakan perangkat lunak *SAP2000* untuk mengevaluasi kondisi eksisting dan berbagai skenario modifikasi.



**Gambar 1.** Lokasi penempatan accelerometer dan titik sondir

Respons getaran sistem struktur terhadap beban dinamik ditentukan oleh karakteristik massa, kekakuan, dan redaman. Dalam pendekatan ideal, perilaku dinamikanya dapat direpresentasikan sebagai sistem satu derajat kebebasan (*Single Degree of Freedom, SDOF*), dengan frekuensi alami:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

dengan  $f_n$  adalah frekuensi alami,  $k$  kekakuan sistem, dan  $m$  massa sistem. Persamaan ini menunjukkan bahwa peningkatan kekakuan struktur akan meningkatkan frekuensi alami, sedangkan peningkatan massa akan menurunkannya. Pada struktur kantilever seperti *flare stack*, peningkatan tinggi struktur tanpa penambahan kekakuan akan menurunkan kekakuan efektif sistem, sehingga frekuensi alami bergeser ke rentang frekuensi rendah dan meningkatkan potensi terjadinya resonansi [1], [10],[15]. Respons struktur terhadap eksitasi periodik dapat dinyatakan melalui faktor amplifikasi dinamik (*Dynamic Amplification Factor, DAF*), yaitu:

$$DAF = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2)$$

dengan  $r = \frac{f}{f_n}$  adalah rasio antara frekuensi eksitasi dan frekuensi alami, serta  $\zeta$  adalah rasio redaman. Nilai *DAF* maksimum terjadi ketika frekuensi eksitasi mendekati frekuensi alami struktur, yang mengindikasikan kondisi resonansi dan potensi terjadinya getaran berlebih [1].

Rambatan dan amplifikasi getaran dalam tanah sangat dipengaruhi oleh sifat dinamik tanah, khususnya kecepatan rambat gelombang geser ( $v_s$ ). Hubungan antara modulus geser kecil dan kecepatan gelombang geser dinyatakan sebagai:

$$G = \rho v_s^2 \tag{3}$$

dengan  $G$  adalah modulus geser kecil dan  $\rho$  massa jenis tanah. Tanah dengan nilai  $v_s$  rendah (tanah lunak) memiliki modulus geser kecil sehingga cenderung mengalami amplifikasi getaran yang lebih besar dibandingkan tanah yang lebih kaku [2], [3], [16]. Perbedaan stratifikasi dan nilai  $v_s$  antar lokasi menyebabkan variasi respons getaran yang dirasakan oleh bangunan di sekitar sumber getaran. Getaran frekuensi rendah dilaporkan lebih mudah merambat melalui tanah lunak dan lebih mudah dirasakan oleh manusia, khususnya pada lingkungan permukiman [2], [17]. Cepat rambat gelombang dalam tanah,  $v_s$  secara empirik dapat dinyatakan seperti pada persamaan berikut [18]:

$$v_s = k q_c^{0.25} \tag{4}$$

di mana  $k$  adalah konstanta empiris (kalibrasi tanah) dan  $q_c$  adalah tanahan konus ( $\text{kg/cm}^2$ ). Selanjutnya kecepatan gelombang geser rata-rata pada kedalaman 30 meter teratas,  $\bar{v}_{s30}$  dihitung dengan:[19]

$$v_{s30} = \frac{30}{\sum \frac{d_i}{v_{si}}} \tag{5}$$

dengan  $d_i$  adalah ketebalan lapisan tanah ke- $i$  dan  $v_{si}$  adalah kecepatan gelombang geser pada lapisan tanah ke- $i$ .

Integrasi ketiga komponen tersebut dilakukan dengan membandingkan kedekatan antara frekuensi eksitasi dan frekuensi alami struktur (indikasi resonansi), serta mengevaluasi kesesuaian tingkat amplifikasi terhadap kondisi kekakuan tanah. Dengan pendekatan ini, amplifikasi getaran dapat dibedakan apakah dikontrol efek interaksi tanah–struktur atau resonansi dinamik struktur. Hasil sintesis tersebut akan menjadi dasar perumusan skenario mitigasi melalui modifikasi kekakuan *flare stack*.

### 3. HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Analisis data percepatan

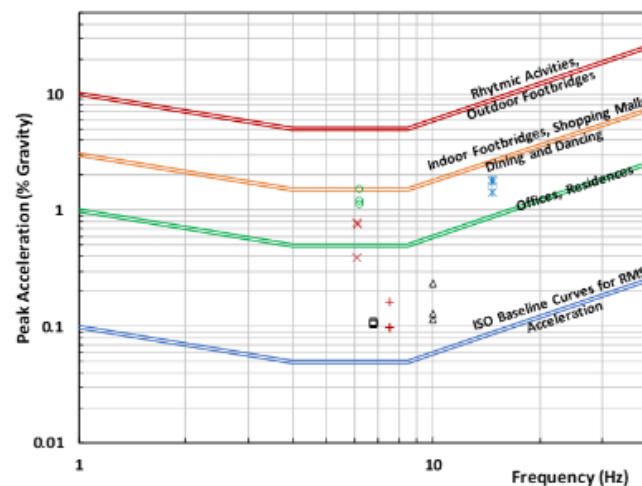
Data percepatan hasil pengukuran accelerometer pada arah x, y, dan z selanjutnya diintegrasikan untuk memperoleh respons kecepatan dan lendutan. Selain itu, analisis *Fast Fourier Transform (FFT)* dilakukan untuk mengonversi data dari domain waktu ke domain frekuensi. Parameter dinamik yang diperoleh, termasuk rasio redaman, disajikan pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Rekapitulasi frekuensi dominan dan *peak response*

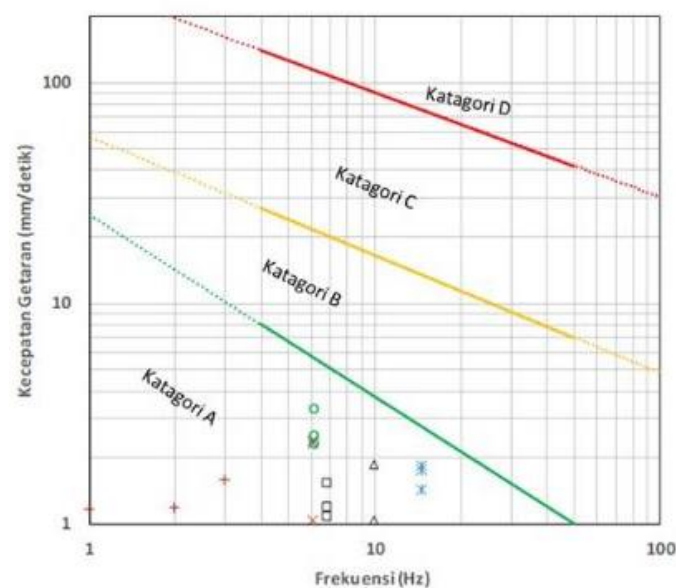
Lokasi	$f$ (Hz)	$a$ ( $\text{m/s}^2$ )	$a$ peak (% gravity)	$v$ peak (mm/det)	$z$ peak (mm)	$damping$ (%)	Legend	Keterangan
S1.1.1x	6.1	0.074	0.76	2.310	128.71	9.423	x	<i>flare stack</i>
S1.1.1y	6.1	0.077	0.78	2.380	130.6	9.423	x	<i>flare stack</i>
S1.1.1z	6.1	0.039	0.39	1.037	58.32	9.423	x	<i>flare stack</i>
S1.1.2x	7.516	0.010	0.10	1.162	33.83	5.216	+	Rumah warga sisi barat
S1.1.2y	7.516	0.010	0.10	1.185	32.81	5.216	+	Rumah warga sisi barat
S1.1.2z	7.516	0.016	0.16	1.589	45.01	5.216	+	Rumah warga sisi barat
S1.1.3x	14.708	0.031	1.83	1.832	81.08	7.627	*	pilecap
S1.1.3y	14.708	0.027	1.75	1.747	54.3	7.627	*	pilecap

Lokasi	$f$ (Hz)	$a$ ( $m/s^2$ )	$a$ peak (% gravity)	$v$ peak (mm/det)	$z$ peak (mm)	damping (%)	Legend	Keterangan
S1.1.3z	14.708	0.030	1.43	1.434	53.14	7.627	*	pilecap
S1.1.4x	6.183	0.119	1.21	2.330	90.9	3.835	o	Rumah warga sisi selatan
S1.1.4y	6.183	0.149	1.52	3.350	135.5	3.835	o	Rumah warga sisi selatan
S1.1.4z	6.183	0.110	1.12	2.530	88.77	3.835	o	Rumah warga sisi selatan
S1.1.5x	6.798	0.011	0.11	1.532	48.54	4.099	*	tanah
S1.1.5y	6.798	0.010	0.10	1.210	32.18	4.099	*	tanah
S1.1.5z	6.798	0.011	0.11	1.087	32.61	4.099	*	tanah
S1.1.6x	9.959	0.011	0.11	0.921	42.27	2.473	D	dinding pagar
S1.1.6y	9.959	0.023	0.24	1.865	115.1	2.473	D	dinding pagar
S1.1.6z	9.959	0.013	0.13	1.035	31.74	2.473	D	dinding pagar

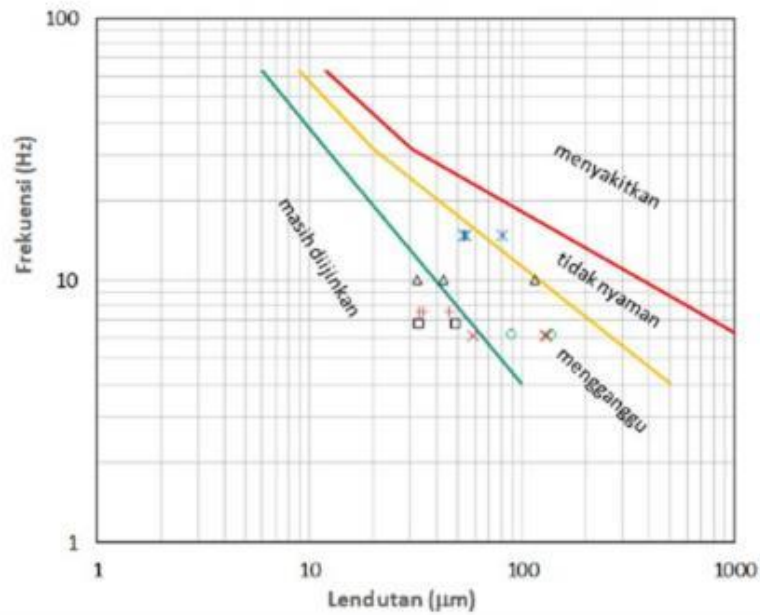
Penilaian akan dilakukan terhadap standar baku getaran dari hubungan frekuensi dengan *peak acceleration* (Gambar 2) [7], hubungan frekuensi dengan *peak velocity* (Gambar 3) [8], dan hubungan frekuensi dengan *peak dynamic displacement* (Gambar 4) [8]. Yang mana hasilnya menunjukkan bahwa percepatan getar yang terjadi melebihi ambang batas kenyamanan yang untuk perkantoran dan hunian, juga berpotensi membuat ketidaknyamanan khususnya akan dirasakan pada lokasi pemukiman.



Gambar 2. Pemenuhan ambang batas getaran (frekuensi dan percepatan puncak)



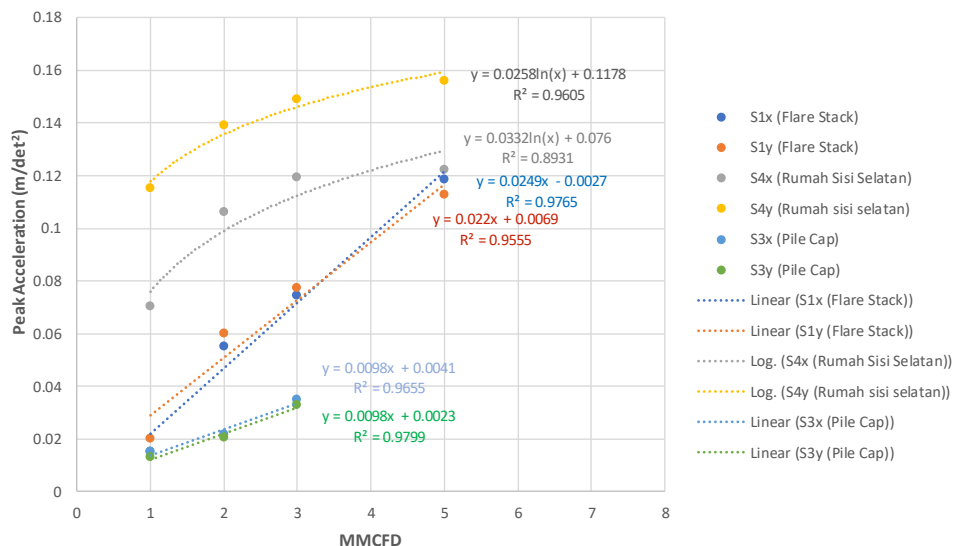
Gambar 3. Pemenuhan ambang batas getaran (frekuensi dan kecepatan puncak)



Gambar 4. Pemenuhan ambang batas getaran (frekuensi dan lendutan puncak)

### 3.2. Analisis laju gas *flaring* dan amplitudo getaran

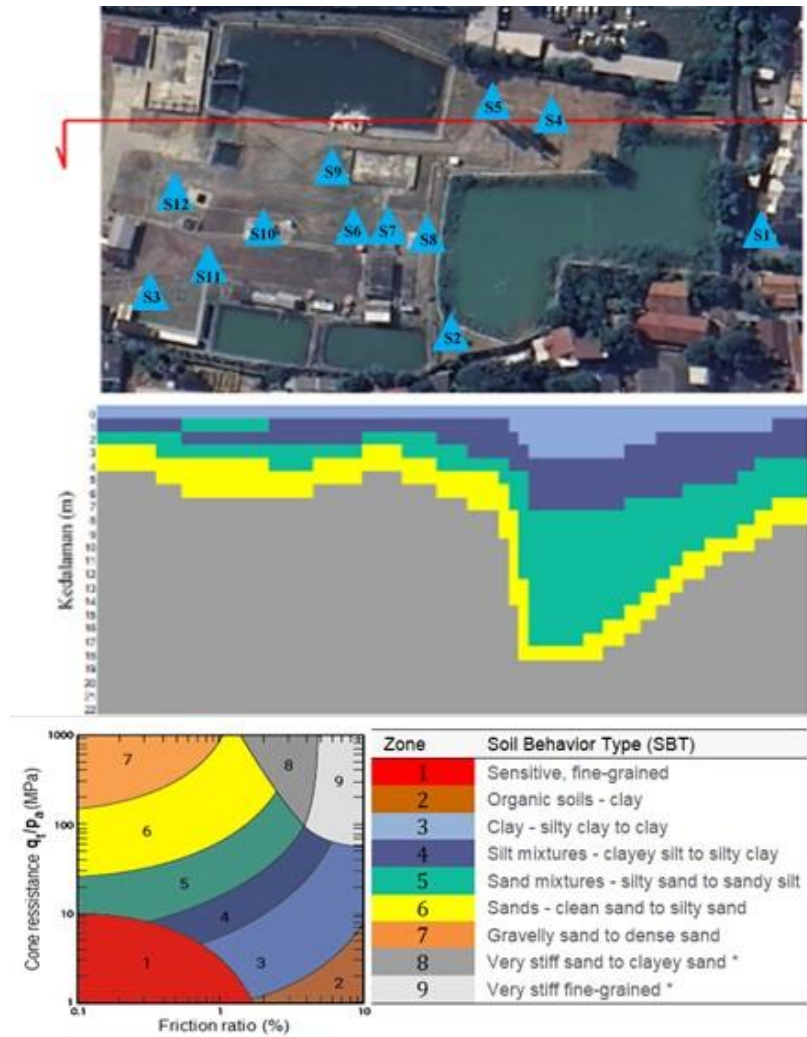
Peningkatan laju alir gas *flaring* berbanding lurus dengan peningkatan amplitudo getaran pada *flare stack* dan *pile cap* (Gambar 5). Temuan ini konsisten dengan teori, di mana peningkatan energi eksitasi akan meningkatkan respons getaran selama sistem berada dalam kondisi linier-elastik [1], [20]. Namun demikian, respons getaran yang terukur pada bangunan warga menunjukkan pola nonlinier, dengan beberapa lokasi mengalami amplifikasi yang lebih besar dibandingkan area di sekitar sumber getaran.



Gambar 5. Hubungan volumetric gas pada saat *flaring* dengan amplitude percepatan getar

### 3.3. Hubungan aktual antara amplifikasi getaran dan propret tanah

Dari stratifikasi tanah interpretasi hasil sondir (Gambar 6) ke arah utara dan selatan *flare stack*, tanah keras (*very stiff sand*) ditemukan pada kedalaman yang lebih dangkal dibandingkan lokasi *flare stack*.



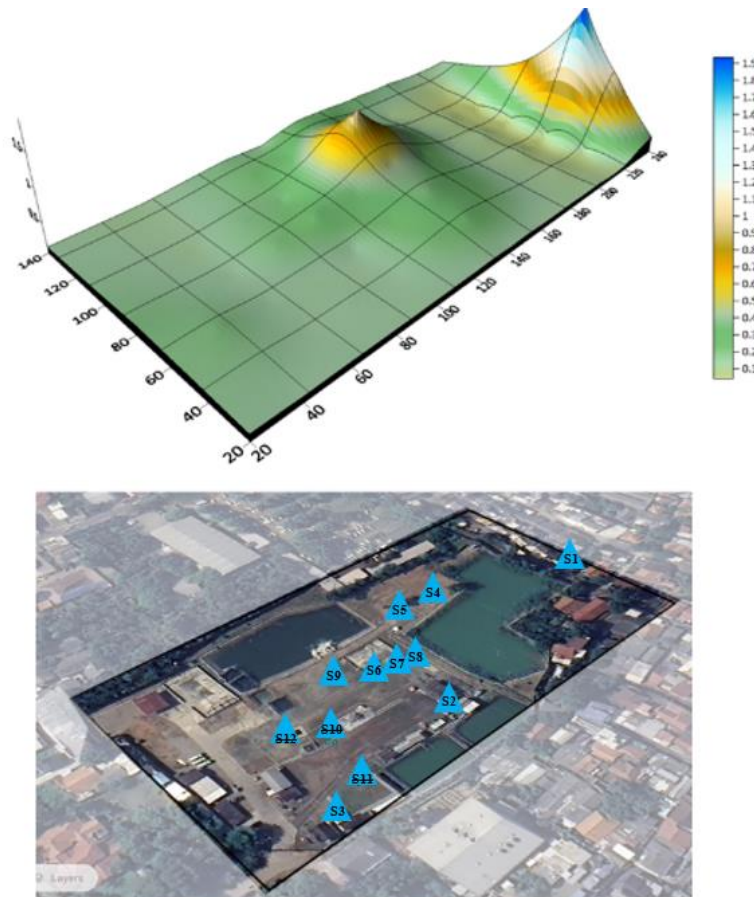
Gambar 6. Stratifikasi tanah (interpretasi hasil sondir) dan amplifikasi relatif terhadap sumber getaran

Tabel 2. Stratifikasi tanah (interpretasi hasil sondir) dan amplifikasi relatif terhadap sumber getaran

z (m)	S1		S2		S3		S4		S5		S6		S7		S8		S9		S10		S11		S12	
	$q_c$	$v_s$	$q_c$	$v_s$	$q_c$	$v_s$	$q_c$	$v_s$	$q_c$	$v_s$	$q_c$	$v_s$	$q_c$	$v_s$	$q_c$	$v_s$	$q_c$	$v_s$	$q_c$	$v_s$	$q_c$	$v_s$	$q_c$	$v_s$
0-2	2	129	1	105	1	116	1	95	1	116	3	148	1	122	3	148	2	131	1	120	1	115	1	124
2-4	2	136	1	119	1	196	1	112	1	123	13	212	12	208	4	161	6	178	5	172	4	160	3	146
4-6	8	190	10	201	25	251	2	131	3	149	25	251	25	251	23	247	25	251	25	251	24	249	16	226
6-8	22	243	25	251	25	251	3	145	4	154	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251
8-10	25	251	25	251	25	251	4	156	4	162	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251
10-12	25	251	25	251	25	251	4	163	3	153	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251
12-14	25	251	25	251	25	251	3	150	5	166	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251
14-16	25	251	25	251	25	251	2	141	4	157	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251
16-18	25	251	25	251	25	251	4	162	6	172	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251
18-20	25	251	25	251	25	251	18	231	20	237	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251
20-22	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251
22-24	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251
24-26	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251
26-28	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251
28-30	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251	25	251
	$\bar{v}_s =$	231	$\bar{v}_s =$	230	$\bar{v}_s =$	239	$\bar{v}_s =$	183	$\bar{v}_s =$	190	$\bar{v}_s =$	242	$\bar{v}_s =$	240	$\bar{v}_s =$	238	$\bar{v}_s =$	239	$\bar{v}_s =$	237	$\bar{v}_s =$	236	$\bar{v}_s =$	234

Catatan: Di bawah *refusal depth*  $q_c > 25$  Mpa, secara konservatif dianggap sama dengan 26 MPa

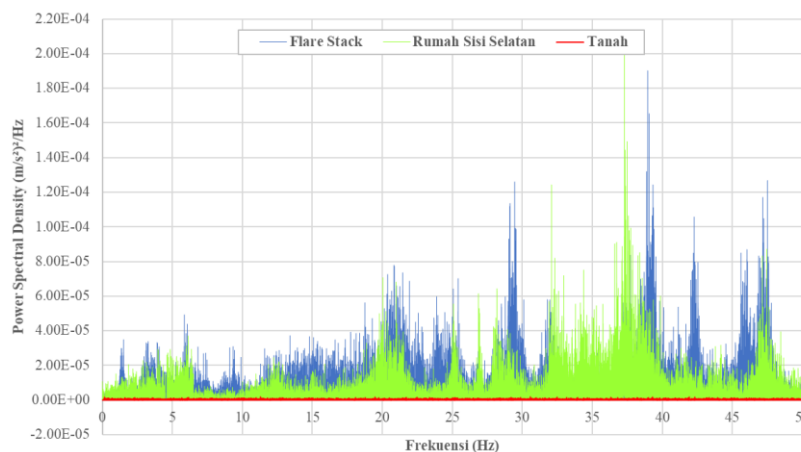
Mengacu pada persamaan (4), cepat rambat gelombang di sekitar lokasi *flare stack* akan melambat (Tabel 2), dimana kondisi ini secara relatif tidak akan mentrigger *DAF*, namun anomali terjadi pada sisi selatan, dimana peningkatan *peak acceleration* Peta peningkatan relatif *peak acceleration* terhadap sumber getaran seperti pada Gambar 7.



**Gambar 7.** Peta Peningkatan relatif peak acceleration terhadap sumber getaran

**3.4. Resonansi melalui mekanisme *acoustic–structure coupling***

Resonansi dapat terjadi melalui mekanisme *acoustic–structure coupling*, yaitu ketika gelombang akustik berfrekuensi rendah yang merambat melalui udara berinteraksi dengan frekuensi alami struktur, sehingga energi akustik ditransfer menjadi respons getaran struktural yang teramplifikasi [21], [22]. Hal ini ditunjukkan dari hasil pengujian bahwa frekuensi alami *flare stack* (6.1 Hz) dan rumah warga sisi selatan (6.183 Hz) berdekatan. Hal ini memicu *DAF*. Perbandingan PSD (**Gambar 8**) menunjukkan bahwa energi getaran pada tanah relatif sangat kecil, sementara respons spektral bangunan hunian jauh lebih besar dibandingkan tanah. Pola ini mengindikasikan bahwa getaran yang teramati tidak didominasi oleh rambatan gelombang melalui tanah. Sebaliknya, amplifikasi lebih mungkin disebabkan oleh resonansi struktur bangunan serta kemungkinan mekanisme kopling udara–struktur (*acoustic–structure coupling*). Konfirmasi lebih lanjut memerlukan pengukuran tekanan akustik secara langsung.



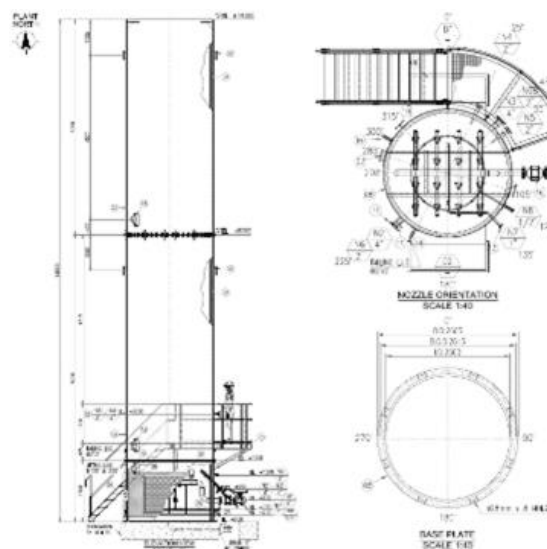
**Gambar 8.** Perbandingan spektrum *Power Spectral Density (PSD)* percepatan getaran

Getaran berfrekuensi rendah cenderung merambat melalui struktur bangunan dan memicu resonansi yang dapat mengganggu lingkungan sekitar, sedangkan getaran berfrekuensi tinggi umumnya cepat teredam sehingga dampaknya lebih terbatas. Frekuensi rendah juga terasa sebagai getaran fisik, sementara frekuensi tinggi terdengar lebih tajam dan nyaring. Kebisingan berfrekuensi rendah memiliki panjang gelombang besar sehingga lebih sulit diserap oleh material bangunan, mampu menembus dan menggetarkan struktur padat, serta merambat pada jarak yang lebih jauh [23]. Warga merasakan gangguan akibat getaran hanya saat proses *flaring* dimana seperti ditunjukkan pada **Gambar 5** peningkatan laju aliran gas saat *flaring*, meningkatkan amplitude getaran ditambah adanya *DAF* karena frekuensi alami *flare stack* berdekatan dengan frekuensi struktur rumah warga.

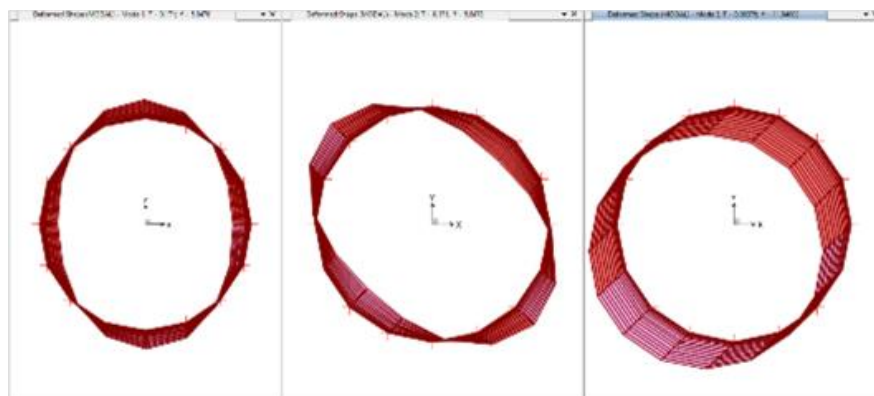
### 3.5. Validasi Model Struktur dan Rekayasa Teknik Menaikkan Frekuensi Alami *Flare Stack*

*General arrangement drawing flare stack* seperti diberikan pada **Gambar 9**. Pemodelan struktur dilakukan dengan dimensi dan property material seperti dalam Gambar 9. Dan dari hasil analisis model diperoleh frekuensi alami mode-1 sebesar 5.874 Hz, nilai ini mendekati hasil pengujian *flare stack*, yaitu 6 - 6.1 Hz. Nilai hasil pengujian dan hasil analisis model nilainya tidak berbeda jauh, untuk itu model dapat dianggap cukup merepresentasikan kondisi aktual.

Idealnya suatu struktur di mode getar awal adalah translasional ke arah-x atau ke arah-y, namun dari hasil analisis struktur, *mode shape* translational baru ada pada mode ke-3. Mode-1 dan Mode-2 bentuk yang terjadi tidak beraturan seperti pada Gambar 10.

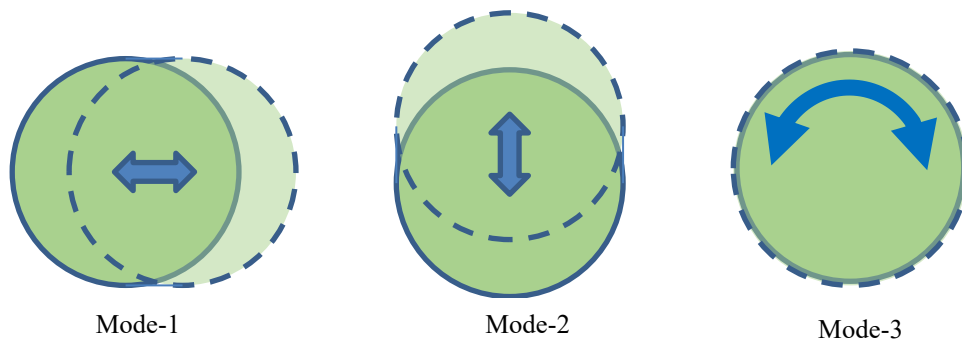


**Gambar 9.** Gambar Flare Stack



**Gambar 10.** Mode shape-1, Mode shape-2 dan Mode shape-3 flare stack saat ini

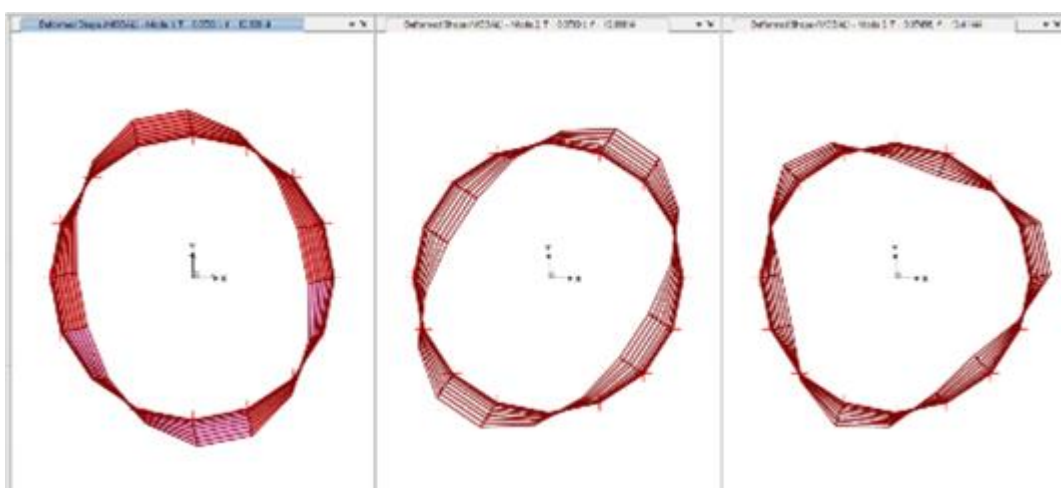
Sementara kondisi ideal *mode shape* struktur silo slender (ramping) dengan *slenderness* ( $H/D$ ) $>2$  adalah sebagaimana gambar berikut [24]:



**Gambar 11.** *Mode shape-1, Mode shape-2 dan Mode shape-3 ideal*

*Mode shape-1* merepresentasikan respon struktur dominan terhadap beban dinamik yang bekerja, tentunya kurang menguntungkan jika yang muncul di mode pertama bukan mode translational, dimana salah satu efek yang dapat ditimbulkan adalah simpangan (getaran) dinamik yang relatif lebih besar.

Peninggian *flare stack* dari ketinggian 8 m menjadi 14 m tanpa adanya perubahan (penebalan) pada elemen *shell* bagian bawah dimana dari level 0 dan sampai dengan 14 m ketebalannya sama, akan menurunkan kekakuan dan frekuensi alaminya. Dengan beban tekanan gas yang sama tentunya amplitude respon akan meningkat. Kondisi ini yang menjadi salah satu trigger terjadinya gangguan di lingkungannya sekitar. Untuk membuktikan kondisi ini, struktur dimodelkan ulang dengan ketinggian awalnya. Dari hasil analisis model diperoleh frekuensi alami mode-1 sebesar 12.698 Hz, selanjutnya nilai ini yang akan menjadi acuan dalam melakukan *exercise* untuk mengembalikan frekuensi alami struktur ke kondisi sebelum ditinggikan. *Flare stack* awal dengan ketinggian 8 m, juga masuk dalam katagori *slender* ( $H/D$ ) $>2$  namun bentuk *mode shape* strukturnya masih belum ideal, seperti pada **Gambar 12**.

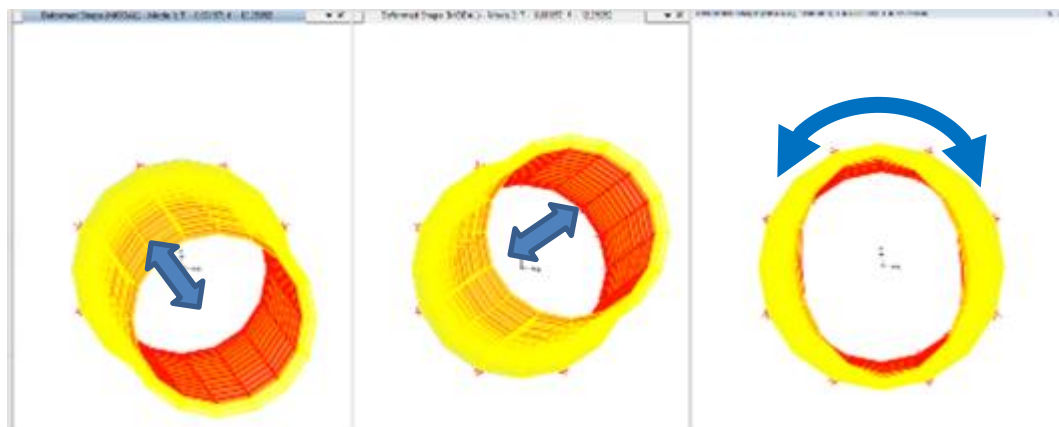


**Gambar 12.** *Mode shape-1, Mode shape-2 dan Mode shape-3 flare stack sebelum ditinggikan*

Selanjutnya akan disimulasikan beberapa model improvisasi struktur untuk menaikkan frekuensi alam struktur yang diharapkan mampu mengurangi jangkauan penyebaran getaran dengan frekuensi rendah. Dalam beberapa model berikut disajikan trial untuk mengembalikan frekuensi alami struktur menjadi 12.698 Hz, sebagaimana **Tabel 3** berikut:

**Tabel 3.** Frekuensi alami dari beberapa alternatif modifikasi *flare stack* dengan penambahan *stiffener*

Modifikasi	Frekuensi alami	Uraian modifikasi
1	6.50 Hz	Menambahkan <i>stiffener</i> vertikal dari base plate sampai ketinggian 2 m tiap 22.5°
2	7.9- Hz	Menambahkan <i>stiffener</i> vertikal dari base plate sampai ketinggian 4 m tiap 22.5°, dengan modifikasi ini frekuensi alami naik menjadi 7.9 Hz.
3	12.60 Hz	Menambahkan <i>stiffener</i> vertikal dari <i>base plate</i> sampai ketinggian 8 m tiap 45°, dengan modifikasi ini frekuensi alami naik menjadi 12.6 Hz. Frekuensi alami dengan modifikasi ini sudah mendekati frekuensi awal <i>flare stack</i> sebelum ditinggikan, namun terlihat <i>mode shape</i> pertama masih bukan <i>mode shape</i> translasional.
4	12.26 Hz	Menambahkan <i>stiffener</i> vertikal dari <i>base plate</i> sampai ketinggian 8 m tiap 45° dengan lebar <i>stiffener</i> vertikal 50 cm dan mengecil menjadi 15 cm pada ketinggian 8 m, tiap 1 m dipasang <i>stiffener</i> melingkar dalam arah tegak lurus bidang <i>flare stack</i> selebar <i>stiffener</i> vertikal, selanjutnya dari 8 m hingga 14 m dipasang <i>stiffener</i> vertikal dengan lebar 25 cm tiap 45°, dan tiap 2 m dipasang <i>stiffener</i> melingkar. Dengan modifikasi ini frekuensi alami naik menjadi 12.26 Hz. Frekuensi alami dengan modifikasi ini sudah mendekati frekuensi awal <i>flare stack</i> sebelum ditinggikan, <i>mode shape</i> pertama pun sudah <i>mode shape</i> translasional.



**Gambar 13.** *Mode shape*-1, *Mode shape*-2 dan *Mode shape*-3 *flare stack* dengan modifikasi-4

Hasil analisis numerik menunjukkan bahwa peningkatan kekakuan struktur melalui penambahan *stiffener* atau penggabungan beberapa *flare stack* menjadi satu sistem struktur terpadu mampu menaikkan frekuensi alami struktur menjauhi rentang frekuensi eksitasi dominan. Strategi ini efektif dalam menurunkan faktor amplifikasi dinamik dan amplitudo getaran terukur, sebagaimana juga direkomendasikan dalam literatur mitigasi getaran struktur industri [10], [11].

Analisis numerik memperlihatkan bahwa modifikasi struktur dengan meningkatkan kekakuan, baik melalui penambahan *stiffener* maupun penggabungan beberapa *flare stack* menjadi satu sistem struktur, mampu menaikkan frekuensi alami mendekati kondisi awal sebelum peninggian. Dalam kajian ini modifikasi-4 seperti yang disampaikan pada **Tabel 3** menghasilkan frekuensi alami 12.26 Hz mendekati frekuensi alami sebelum peninggian 12.689 Hz, dengan *mode shape* **Error! Reference source not found.** di mana sudah merepresentasikan *mode shape* ideal seperti yang ditunjukkan **Gambar 11**.

#### 4. KESIMPULAN

Peninggian *flare stack* pada sistem *EHTFS* menurunkan frekuensi alami struktur dan meningkatkan potensi resonansi pada frekuensi rendah. Interaksi tanah–struktur secara teoritis berperan signifikan dalam amplifikasi getaran, di mana pada lokasi dengan tanah lunak respons getaran dapat lebih besar dibandingkan di sekitar sumber, namun pada lokasi studi rumah warga yang tanahnya tidak lebih lunak dari lokasi sumber terjadi amplifikasi getaran pada saat *flaring*. Kondisi ini diakibatkan amplifikasi getaran dinamik akibat resonansi frekuensi rendah dimana frekuensi getaran saat *flaring* berdekatan dengan frekuensi alami rumah warga yang terdampak. Mitigasi getaran dapat dilakukan secara efektif melalui peningkatan kekakuan struktur *flare stack*. Pendekatan terpadu berbasis *Operational Modal Analysis* dan evaluasi interaksi tanah–struktur terbukti efektif sebagai dasar perumusan strategi mitigasi

getaran pada fasilitas *flaring* industri. Sebagai target desain mitigasi, frekuensi alami pasca-modifikasi direkomendasikan berada di luar zona  $\pm 20\%$  dari frekuensi eksitasi dominan ( $\sim 6,1-6,2$  Hz). Secara praktis, pemisahan frekuensi minimum ditetapkan  $f_n \geq 1,2 f$  ( $\approx 7,4$  Hz), dengan target yang lebih konservatif  $f_n \geq 1,3 f$  ( $\approx 8,1$  Hz), dapat mengurangi risiko *near-resonance*. Namun dalam kasus ini karena targetnya adalah untuk mengembalikan kekakuan sistem ke kekakuan awal, meminimalkan gangguan operasi dan risiko lapangan maka dipilih modifikasi-4.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Hesa Laras Cemerlang (<https://hesa.co.id>) yang telah mendukung pelaksanaan pengukuran lapangan selama penelitian ini berlangsung.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. K. Chopra, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. in Always learning. Pearson, 2017. [Online]. Available: [https://books.google.co.id/books?id=R8\\_XjwEACAAJ](https://books.google.co.id/books?id=R8_XjwEACAAJ)
- [2] C. Scawthorn and S. L. Kramer, "Geotechnical earthquake considerations," *Bridge Engineering Handbook (2nd Edition)-Seismic Design*, pp. 1–51, 2014.
- [3] J. Lysmer and R. L. Kuhlemeyer, "Finite dynamic model for infinite media," *Journal of the engineering mechanics division*, vol. 95, no. 4, pp. 859–877, 1969.
- [4] B. Peeters and G. De Roeck, "Reference-Based Stochastic Subspace Identification for Output-Only Modal Analysis," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 13, no. 6, pp. 855–878, Nov. 1999, doi: 10.1006/mssp.1999.1249.
- [5] R. Brincker, L. Zhang, and P. Andersen, "Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition," *Smart Mater. Struct.*, vol. 10, no. 3, pp. 441–445, Jun. 2001, doi: 10.1088/0964-1726/10/3/303.
- [6] P. Van Overschee and B. De Moor, *Subspace Identification for Linear Systems*. Boston, MA: Springer US, 1996. doi: 10.1007/978-1-4613-0465-4.
- [7] International Organization for Standardization, *ISO-2631-2:1989, Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 Hz–80 Hz)*. 1989.
- [8] Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Indonesia No. 49, *Baku Tingkat Getaran*. Indonesia, 1996.
- [9] R. Brincker and C. Ventura, *Introduction to Operational Modal Analysis*. 2015. doi: 10.1002/9781118535141.
- [10] H. Bachmann *et al.*, *Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines*. Birkhäuser Basel, 2012. [Online]. Available: <https://books.google.com.ec/books?id=pth5BgAAQBAJ>
- [11] A. Preumont, *Responsive Systems for Active Vibration Control*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2002. doi: 10.1007/978-94-010-0483-1.
- [12] H. Khoeri and S. W. Alisjahbana, "Pemeriksaan Getaran Struktur dan Rekomendasi Perkuatan untuk Peningkatan Kapasitas Beban dan Pengurangan Getaran," *Konstruksia*, vol. 15, no. 1, p. 79, Dec. 2023, doi: 10.24853/jk.15.1.79-96.
- [13] N. R. Rizqullah, H. Khoeri, H. K. Buwono, and B. Badaruddin, "Pemodelan berbasis Uji Non-Destruktif dan Semi-Destruktif yang Divalidasi Uji Vibrasi pada Asesmen Reliabilitas Pondasi Jibrane," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS*, Program Studi Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2024.
- [14] H. Khoeri, D. Sofiana, P. Nugroho, and R. F. Muthohari, "Operational Dynamic Load Testing for Repair Recommendations, Case Study of Access Road to Vehicle Weight in Motion," *Jurnal Ilmiah Dinamika Rekayasa*, vol. 20, no. 2, pp. 173–182, 2024.
- [15] Kausel E., *Advanced Structural Dynamics*. Cambridge University Press, 2017.

- [16] J. P. Wolf, *Dynamic Soil-structure Interaction*. in Prentice Hall Advanced Reference Series. Prentice-Hall, 1985. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=0ORRAAAAMAAJ>
- [17] ISO 4866, *Mechanical vibration and shock-Vibration of fixed structures-Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures*. 2010.
- [18] T. Imai and Y. Yoshimura, “The relation of mechanical properties of soils to P and S-wave velocities for ground in Japan,” *Technical Note OYO Corporation*, 1975.
- [19] G. G. Meyerhof, “Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils,” *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, vol. 82, no. 1, Jan. 1956, doi: 10.1061/JSFEAQ.0000001.
- [20] BSN, *SNI 1729:2020, Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural*. Jakarta, Indonesia: Badan Standarisasi Nasional, 2020.
- [21] A. D. Pierce, *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-030-11214-1.
- [22] F. Fahy and J. Thoma, “Sound and Structural Vibration Radiation, Transmission and Response,” *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 108, no. 4, pp. 374–374, Dec. 1986, doi: 10.1115/1.3143810.
- [23] A. Elang Fachri, “Suara Frekuensi Tinggi dan Rendah,” *Adikari Wisesa Indonesia*, 2021.
- [24] A. K. Jain, R. Bhargava, and A. Rawat, “Designing regression approach for mode frequency prediction of empty and filled steel silos,” *Heliyon*, vol. 9, no. 12, p. e22764, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22764.